

# ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ ПО КРИТЕРИЯМ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

## OPTIMIZATION OF ROLLING CONDITIONS ON THE CRITERIA OF THE MECHANICAL PROPERTIES

В.А. Шилов<sup>1</sup>, А.А. Пономарев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГАОУ ВПО «Уральский Федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург. E-mail: omd@mtf.ustu.ru.

<sup>2</sup> ОАО «Нижнесергинский метизно-металлургический завод» филиал «Березовский», г. Березовский

### Abstract

Develop scientifically proved method of optimization process conditions rolling of wire rod and rebar in modern light section-wire mills in order to improve the complex of mechanical properties of products. Examples are given to optimize rolling modes in conditions Light section-wire mill 150 of «NSMMZ» (Berezovsky).

Улучшение механических свойств металлопроката является одной из важных задач развития современной металлургии, так как позволяет получить существенную экономию в различных отраслях промышленности и строительства. Поэтому при прокатке на новых и действующих станках необходимо применять оптимальные технологические режимы, обеспечивающие максимально возможное (в пределах стандартов) повышение прочностных и пластических свойств проката (например, предела прочности  $\sigma_b$ , относительного сужения  $\psi$  и др.).

Для разработки таких оптимальных технологических режимов прокатки катанки и мелко-сортных профилей на новом мелко-сортном проволочном стане 150 ОАО «НСММЗ» [1] применили методы исследования операций [2, 3]. При этом в качестве целевой функции (критерия оптимизации)  $w$  принимали основную, соответствующую заданному (по ГОСТ или ТУ) назначению проката механическую характеристику  $Z$  (например, для арматурной стали  $Z$  – предел прочности  $\sigma_b$ , а для низкоуглеродистой катанки прямого волочения  $Z$  – относительное сужение  $\psi$ ). Одновременно учитывали установленные стандартами предельные значения:  $Z_{\min} < Z < Z_{\max}$ , а также ограничения на другие механические свойства ( $\delta_5$ ,  $\psi$ ,  $\sigma_T$  и др.).

В качестве дескриптивной математической модели, выражающей зависимость оптимизируемой величины  $Z$  от параметров термомеханической обработки, приняли соответствующие уравнения регрессии, полученные в работе [5]. Для расчета технологических параметров процесса прокатки на стане 150 применили математическую модель УрФУ [6], реализованную в виде экспертной системы «Технология сортовой прокатки» [7, 8]. Для определения температурного состояния металла на различных участках стана использовали специально разработанную математическую модель температурных режимов прокатки и охлаждения раската [9]. В соответствии с указанными математическими моделями необходимо сформировать вектор управления технологическими режимами  $U$  ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  и др.). Оценивая составляющие этого вектора по значимости влияния на оптимизируемую механиче-

скую характеристику, выделяют наиболее значимый параметр управления  $X$  и ранжируют по значимости остальные управляющие параметры, входящие в полученные уравнения регрессии (8 – 11) [5].

С учетом изложенного задача оптимизации режима сводится к поиску такого управления  $U^*(X^*)$ , при котором достигается максимум целевой функции:

$$Z^* = \max[Z(X^*)] \quad (1)$$

$X^* \in U$

Для поиска экстремума целевой функции в подобных задачах обычно применяют численные методы оптимизации [4, 10], которые базируются на вычислительных и логических операциях и сводятся к построению алгоритмов с использованием эвристических соображений. Одним из таких методов является метод возможных направлений [10].

Сущность этого метода заключается в следующем: из начальной допустимой (по условиям задачи) точки  $X_0$  осуществляется переход к новой допустимой точке, в которой значение целевой функции  $Z$  лучше, чем в точке  $X_0$ . Этот процесс продолжается до тех пор, пока сохраняется возможность улучшения  $Z$  в пределах действующей системы ограничений, т.е. в допустимой области. Если определена очередная точка  $X_k$ , то переход к следующей точке осуществляется в соответствии с формулой:

$$X_{k+1} = X_k \pm a_k \Gamma_k, \quad (2)$$

где  $a_k$  – величина  $k$ -го шага,  $\Gamma_k$  – единичный вектор, в направлении которого производится этот шаг.

Если вектор управления  $U$  содержит несколько параметров  $X$  ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ...), то описанную процедуру оптимизации следует проделать по каждому параметру  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ..., начиная с наиболее значимого параметра.

На основе рассмотренных выше общих положений разработан алгоритм поиска оптимальной механической характеристики  $Z$ . При заданных в исходной информации размерах и требуемых механических свойствах  $Z$  ( $Z_{\min} < Z < Z_{\max}$ ) в общем случае алгоритм включает следующие операции:

1. В математической модели (8 – 11) [5] выделяют уравнение регрессии, выражающее зави-

симось механической характеристики  $Z$  от термо-механических параметров  $X_i$  ( $d$ ,  $V_k$ ,  $t_{в/о}$  и др.). Анализируя это уравнение, ранжируют параметры управления  $X_i$  по значимости влияния на  $Z$ , определяют возможные направления изменения каждого параметра  $X_i$  при максимизации  $Z$ .

2. Присваивают каждому параметру управления численные значения с учетом опыта производства аналогичных видов проката (при этом целесообразно использовать базы данных, архивы стана или проектные режимы) и рассчитывают по уравнению регрессии начальное приближение характеристики  $Z=Z_0$ .

3. Далее ведут оптимизацию с изменения наиболее значимого управляющего параметра  $x_1$ , в качестве которого обычно используется температурный фактор (например, температура конца прокатки или температура виткообразования).

3.1. По разработанной модели и алгоритмам расчета температурного режима прокатки и охлаждения металла [9] определяют температуру раската на каждом участке стана (в черновой, промежуточной и предчистовых группах клетей, в камерах предварительного водяного охлаждения, в чистовом блоке клетей, на виткоукладчике и т.д. (рис.1)).

3.2. Моделируют в экспертной системе «Технология сортовой прокатки» процесс прокатки заданного профиля с максимально возможной конечной скоростью прокатки, в результате чего рассчитывают все технологические и энергосиловые параметры.

3.3. Проверяют ограничения рассчитанного режима по силовой нагрузке оборудования стана. Если какое-либо ограничение не выполняется, вносят соответствующие изменения в управляющие параметры и производят повторные расчеты в ЭС «Технология сортовой прокатки».

3.4. По регрессионной модели (8 – 11) при полученных параметрах управления рассчиты-

вают новое значение (новое приближение) характеристики  $Z=Z_1$ .

3.5. Проверяют ограничения по механическим свойствам  $Z_{\min} < Z < Z_{\max}$  и оценивают степень близости  $Z_1$  к  $Z_{\max}$  с принятой точностью:

$$\frac{Z_{\max} - Z_1}{Z_{\max}} < 0,05 \quad (3)$$

Если это условие не выполняется, и рассчитанное значение  $Z_1$  далеко от максимального по ГОСТ, то принимают новое значение управляющего параметра согласно условия (2) и производят повторные расчеты по пунктам 3.1 – 3.5 до выполнения условия (3). Окончательно полученное значение  $Z_1$  считается условно оптимальным  $Z_1 = Z^*(X_1^*)$ .

4. Проводят оптимизацию по следующему по значимости управляющему параметру  $x_2$ , изменяя его от исходного значения, принятого ранее, в направлении, способствующем максимизации  $Z$ . При этом проводят необходимые расчеты с использованием разработанных алгоритмов и программ и в результате получают оптимальное значение  $x_2^*$  и новое, условно оптимальное значение целевой функции  $Z^*(x_1^*, x_2^*) < Z_{\max}$ . Если в ходе расчетов получается  $Z > Z_{\max}$ , то меняют направление изменения  $x_2$  на обратное.

5. Аналогично проводят оптимизацию по каждому из оставшихся параметров управления и окончательно получают технологический режим с оптимальным значением механической характеристики  $Z^*(x_1^*, x_2^*, x_3^* \dots)$ .

При этом в качестве возможных направлений оптимизации используют температурный режим прокатки, конечную скорость прокатки, скорость движения транспортера витков, количество открытых и закрытых крышек и т.п.

По разработанному алгоритму были рассчитаны приводимые ниже оптимальные технологические режимы производства проката различного назначения.

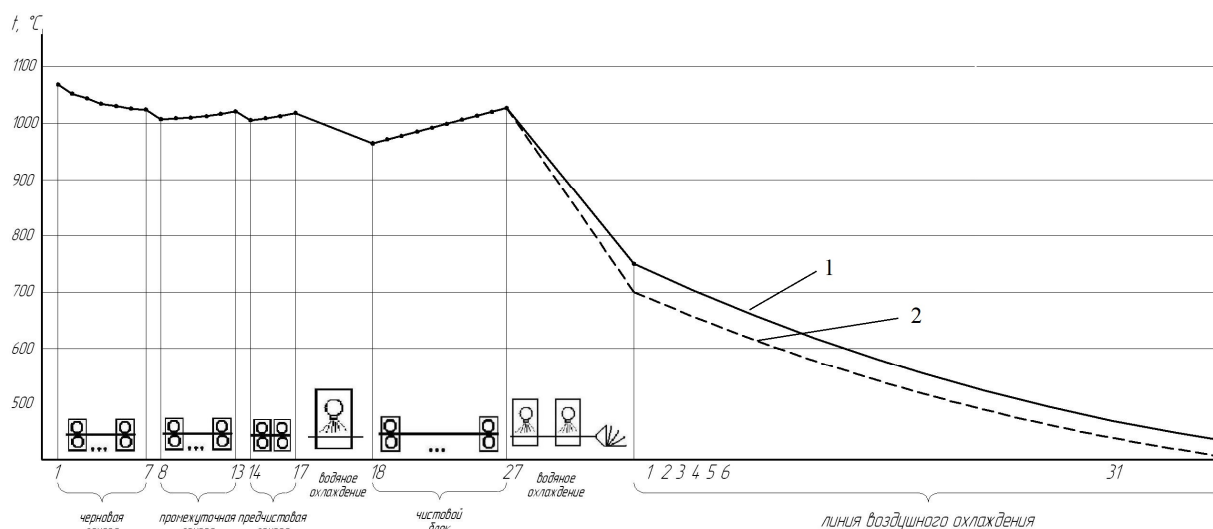


Рис.1. Температурный режим при прокатке арматурной стали №6 из стали СтЗсп:  
1 – исходный; 2 – оптимальный.

### Арматурный профиль №6 класса А500 из стали марки СтЗсп.

В качестве исходного режима прокатки и охлаждения был выбран пусковой режим, который характеризуется следующими параметрами: конечная скорость прокатки  $V_k=110$  м/с; температура нагрева  $t_n=1080^\circ\text{C}$ ; температура виткообразования  $t_{в/о}=750^\circ\text{C}$ ; все термоизоляционные крышки открыты, вентиляторы отключены; скорость роликового транспортера  $V_r=0,40\div 0,65$  м/с.

Оптимизация проводится с целью получения максимально возможного значения  $\sigma_b$ , т.е. целевая функция записывается в виде:

$$W^* = \sigma_b^* \rightarrow \max [W(q, U^*)] \quad (4)$$

при выполнении ограничений по силовой загрузке оборудования,  $\sigma_{b\min} \leq \sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2} \geq \sigma_{0,2\min}$ ,  $\delta_s \geq \delta_{s\min}$ .

По алгоритмам расчета температурного режима прокатки и охлаждения металла была определена температура раската на каждом участке стана (рис. 1).

При имеющихся исходных данных технологического режима было проведено моделирование в экспертной системе «Технология сортовой прокатки». Результаты расчета показали, что при прокатке арматурного профиля №6 все наложенные ограничения по энергосиловой загрузке оборудования выполняются, т.к.  $k_p < 1,0$ ;  $k_m < 1,0$  и  $k_{дв} < 1,0$ .

По регрессионным моделям механических свойств (8), (10), (11) [5] рассчитали:  $\sigma_b=620,9$  МПа,  $\sigma_{0,2}=495,2$  МПа,  $\delta_s=21,29\%$ . Получили, что условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  при заданном режиме не соответствует требованиям стандарта ( $\sigma_b \geq 600$  МПа,  $\sigma_{0,2} \geq 500$  МПа,  $\delta_s \geq 14\%$ ), а предел прочности далек от максимального.

Для увеличения условного предела текучести и дальнейшего увеличения временного сопротивления разрыву понизили температуру виткообразования до  $700^\circ\text{C}$  путем увеличения расхода воды в камерах водяного охлаждения. Поскольку режим обжаты и скорость прокатки оставались неизменными, ограничения по загрузке оборудования выполняются. Проведя пересчет по регрессионным уравнениям, получили:  $\sigma_b^*=692,37$  МПа,  $\sigma_{0,2}=523,9$  МПа,  $\delta_s=20,03\%$ . Полученные значения полностью удовлетворяют требованиям стандарта. В результате оптимизации по критерию (4) предел прочности увеличился на 72 МПа.

Таким образом, новый, оптимизированный режим прокатки арматурного профиля №6 класса А500 из стали СтЗсп выглядит следующим образом: температура нагрева заготовки  $t_n=1080^\circ\text{C}$ ; конечная скорость прокатки  $V_k=110$  м/с; суммарный расход воды в камерах WB3 – WB6  $w=212$  м<sup>3</sup>/ч; температура виткообразования  $t_{в/о}=700^\circ\text{C}$ ; все термоизоляционные крышки открыты, вентиляторы отключены; скорость роликового транспортера  $V_r=0,40\div 0,65$  м/с.

Полученный с использованием предложенного алгоритма режим термомеханической обработки позволяет предельно увеличить прочностные свойства проката при максимальной производительности стана.

### Катанка диаметром 5,5 мм из стали марки Св-08Г2С.

В качестве начальных параметров для оптимизации был задан пусковой режим прокатки: температура нагрева заготовки  $t_n=1060^\circ\text{C}$ ; конечная скорость прокатки  $V_k=110$  м/с; температура виткообразования  $t_{в/о}=900^\circ\text{C}$ ; теплоизоляционные крышки закрыты с номера 5 по 31, вентиляторы отключены; скорость роликового транспортера  $V_r=0,07\div 0,17$  м/с.

Оптимизация проводится с целью получения максимально возможного значения  $\psi$ , т.е. целевая функция записывается в виде:

$$W^* = \psi^* \rightarrow \max [W(q, U^*)] \quad (5)$$

при выполнении ограничений по силовой загрузке оборудования,  $\sigma_b \leq \sigma_{b\max}$ ,  $\psi \geq \psi_{\min}$ .

По алгоритмам расчета температурного режима прокатки и охлаждения была определена температура раската на всех участках стана (рис. 2). Моделирование технологических и энергосиловых параметров прокатки, проведенное в экспертной системе «Технология сортовой прокатки» показало, что все ограничения по энергосиловой загрузке стана выполняются. Выполнив расчет по регрессионным моделям (8) и (9) [5], получили  $\psi=56,92\%$ ,  $\sigma_b=641,72$  МПа. Полученное значение относительного сужения соответствует требованиям стандарта ( $\psi \geq 50\%$ ,  $\sigma_b \leq 590$  МПа), однако временное сопротивление разрыву значительно превышает максимально допустимое, т.е. ограничение  $\sigma_b \leq \sigma_{b\max}$  не выполняется.

Дальнейшую оптимизацию провели по наиболее значимому фактору – температуре виткообразования, задав ее равной максимально допустимой ( $t_{в/о}=950^\circ\text{C}$ ). Проведя соответствующие расчеты по п.п. 3 – 5 алгоритма, получили новое условно оптимальное значение относительного сужения  $\psi_2^*=69,7\%$  при временном сопротивлении  $\sigma_b=605,23$  МПа. Полученное значение  $\sigma_b$  превышает максимально допустимое, т.е. ограничение  $\sigma_b \leq \sigma_{b\max}$  также не выполняется.

Поскольку дальнейшее повышение температуры виткообразования невозможно (ввиду роста количества остаточной окалины), оптимизацию провели по времени охлаждения на роликовом транспортере. Для этого увеличили время нахождения витков катанки под закрытыми теплоизоляционными крышками №1 – 6. В соответствии с п.2 был рассчитан новый температурный режим прокатки при  $\tau_{отк}=158,95$  с,  $\tau_{зак}=1132,58$  с,  $\tau_{вент}=0$  с (рис. 2). При неизменных деформационном и скоростном режимах ограничения по энергосиловой загрузке стана выполняются.

В результате расчета по уравнениям регрессии (8) и (9) [5] получили новое условно оптимальное значение относительного сужения  $\psi_3^*=74\%$ , при этом временное сопротивление разрыву составило  $\sigma_b=563,24$  МПа. Полученные значения соответствуют требованиям стандарта.

В результате получили новый технологический режим, который выглядит следующим образом: температура нагрева заготовки  $t_n=1060^\circ\text{C}$ ; ко-

конечная скорость прокатки  $V_k=110$  м/с; суммарный расход воды в камерах WB3 – WB6  $w=82$  м<sup>3</sup>/ч; температура виткообразования  $t_{в/о}=950^\circ\text{C}$ ; все термо-

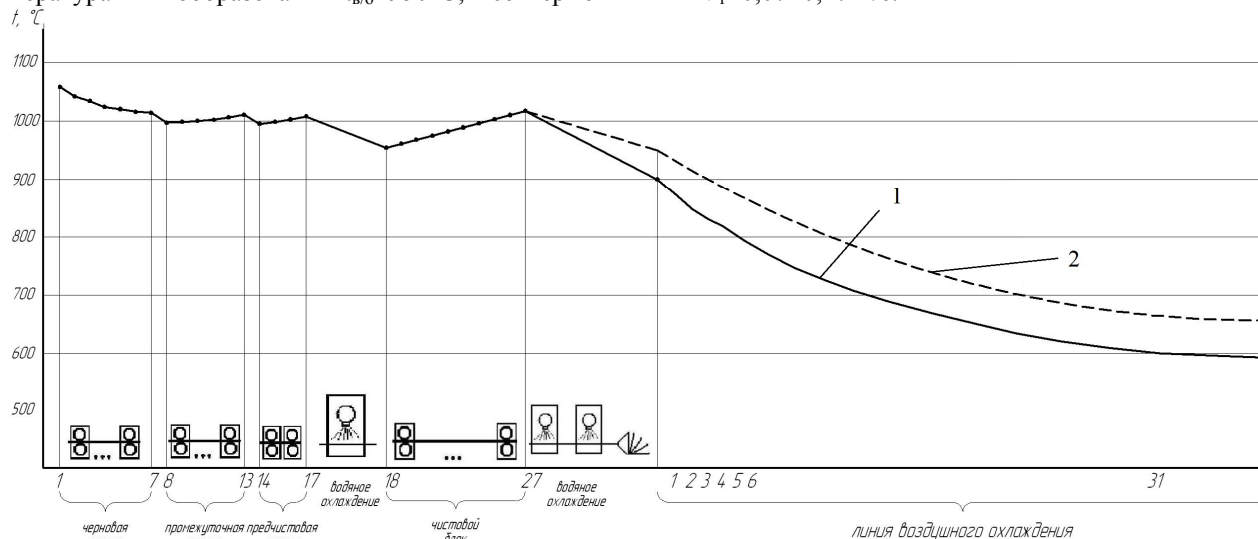


Рис. 2. Температурный режим при прокатке катанки диаметром 5,5 мм из стали Св-08Г2С: 1 – исходный; 2 – оптимальный.

проведенная оптимизация режима разупрочняющей термомеханической обработки катанки диаметром 5,5 мм из стали Св-08Г2С позволила получить высокую пластичность металла, при заданном уровне прочностных свойств и оптимальном количестве остаточной окалины.

#### Кордовая катанка диаметром 5,5 мм из высокоуглеродистой стали марки 70.

В качестве начальных параметров для оптимизации был задан пусковой режим прокатки: температура нагрева заготовки  $t_n=1055^\circ\text{C}$ ; конечная скорость прокатки  $V_k=110$  м/с; температура виткообразования  $t_{в/о}=950^\circ\text{C}$ ; все теплоизоляционные крышки открыты, вентиляторы отключены; скорость роликового транспортера  $V_t=0,8\div 1,2$  м/с. Расчетное время охлаждения на роликовом транспортере составило  $\tau_{отк}=116,83$  с,  $\tau_{зак}=0$  с,  $\tau_{вент}=0$  с.

При заданных исходных условиях по алгоритмам и программам расчета температурного режима прокатки и охлаждения [9] была определена температура раската на всех участках стана (рис. 3, кривая 1). Моделирование технологических и энергосиловых параметров прокатки, проведенное в экспертной системе «Технология сортовой прокатки», показало, что все ограничения технологического режима выполняются. Выполнив расчет по регрессионным моделям (8) и (9) [5], получили  $\psi=65,74\%$ ,  $\sigma_b=720,25$  МПа. Полученное значение относительного сужения соответствует требованиям стандарта ( $\psi\geq 28\%$ ,  $\sigma_b=950\div 1180$  МПа), однако временное сопротивление разрыву  $\sigma_b<\sigma_{bmin}$ . Поэтому оптимизацию провели по критерию

$$W^*=\sigma_b^* \rightarrow \max [W(q,U^*)]. \quad (6)$$

изоляционные крышки закрыты, вентиляторы отключены; скорость роликового транспортера  $V_t=0,07\div 0,17$  м/с.

Вначале провели оптимизацию с управлением по температуре виткообразования, приняв ее равной  $900^\circ\text{C}$ . Температурный режим прокатки и охлаждения по такому режиму представлен на рис. 3 (кривая 2).

На рис. 3 видно, что в процессе прокатки в блоке клетей раскат значительно разогревается, и ускоренное охлаждение в камерах за блоком клетей может привести к образованию участков подкалки, что не допускается техническими условиями. Поэтому была снижена конечная скорость прокатки до 85 м/с. Рассчитанный температурный режим прокатки приведены на рис. 3 (кривая 3).

Проведя соответствующие расчеты по п. 5 алгоритма, получили новое условно оптимальное значение относительного сужения  $\psi_2^*=53,32\%$  при временном сопротивлении  $\sigma_b=820,16$  МПа. Полученное значение  $\sigma_b$  также не соответствует требованиям стандарта.

Поскольку дальнейшее снижение скорости прокатки приведет к снижению производительности стана, в качестве нового параметра управления выбрали время охлаждения вентиляторным воздухом на участке роликового транспортера, задав его равным 18,1 с, что соответствует пяти включенным вентиляторам. График изменения температуры раската в процессе прокатки и охлаждения представлен на рис. 3 (кривая 3).

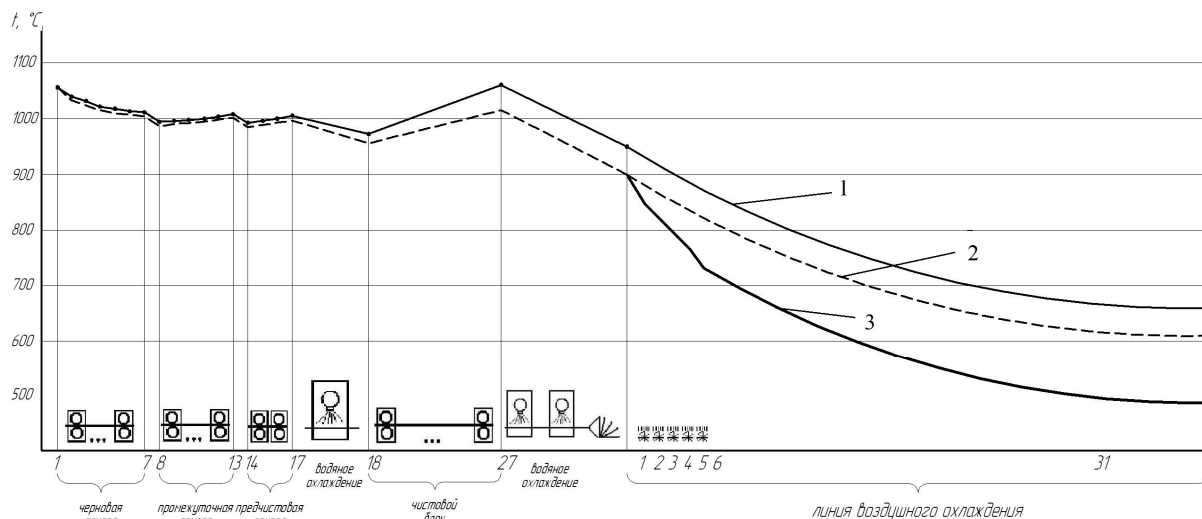


Рис. 3. Температурный режим при прокатке катанки диаметром 5,5 мм из стали 70:  
1 – исходный; 2 – условно оптимальный при температуре виткообразования 900°C; 3 – оптимальный режим при охлаждении витков на транспортере вентиляторным воздухом.

В результате расчетов получили новое значение относительного сужения –  $\psi_3^* = 40,05\%$  и временного сопротивления разрыву  $\sigma_v = 1030$  МПа. Полученные значения механических свойств полностью удовлетворяют условиям стандарта. При этом энергосиловая нагрузка оборудования понизилась.

Таким образом, проведенная для катанки диаметром 5,5 мм из высокоуглеродистой кордовой стали 70 оптимизация позволила получить удовлетворительное значение относительного сужения при высокой прочности.

#### Выводы.

На основе полученных ранее в УрФУ математических моделей технологических процессов сортовой прокатки с применением методов исследования операций разработана методика оптимизации режимов термомеханической обработки раската на современном мелкосортно-проволочном стане с целью улучшения механических свойств проката. Использование этой методики на стане 150 ОАО «НСММЗ» позволило увеличить предел прочности арматурной стали №6 класса А500 из стали СтЗсп на 72 МПа, получить высокое значение относительного сужения сварочной катанки Ø5,5 мм из стали Св-08Г2С (74%) при ограничениях по временному сопротивлению разрыву и добиться оптимального сочетания пластических и прочностных свойств кордовой катанки из высокоуглеродистой стали 70.

Применение разработанной методики оптимизации является полезным для условий прокатки на аналогичных станах.

#### Библиографический список

1. Пономарев А.А., Гурбан Е.С., Шилов В.А. Новый мелкосортно-проволочный стан. // Производство проката. 2010. №8. С. 13-14.
2. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1980. 208 с.
3. Вагнер Г. Основы исследования операций: Пер. с англ. М.: Мир, Т1. 1972. 366с; Т2. 1973. 488с. Т3. 1973. 501с.
4. Оптимизация прокатного производства/А.Н. Скороходов, П.И. Полухин, Б.М. Илюкович и др. М.: Металлургия, 1983. 432с.
5. Пономарев А.А., Шилов В.А. Математическая модель механических свойств проката мелкосортно-проволочного стана 150. // Производство проката. 2012. №11. С. 12-16.
6. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инатович Ю.В. Калибровка прокатных валков. М.: Тепло-техник, 2008. 491 с.
7. Куделин С.П., Инатович Ю.В., Шилов В.А. Экспертная система технологии сортовой прокатки. // Программные продукты и системы. 2000. №3. С.35–39.
8. Шилов В.А., Смирнов В.К., Эйдензон В.М. Новое поколение САПР технологии сортовой прокатки. // Сталь, 2001. №4. С. 36 – 38.
9. Пономарев А.А., Шилов В.А., Николаев М.С. Управление температурными режимами прокатки на мелкосортно-проволочном стане. // Производство проката. 2011. №8. С. 18 – 23.
10. Дегтярев Ю.И. Методы оптимизации. М.: Радио, 1980. 272 с.